

ANALISIS PENGARUH KARAKTERISTIK PROPELAN TERHADAP BALISTIK INTERIOR PADA MUNISI KALIBER KECIL

ANALYSIS OF INFLUENCE OF PROPELANT CHARACTERISTICS ON INTERIOR BALLISTICS IN THE SMALL KALIBER MUNITION

Nadhifa Adliana¹, Romie O. Bura², Yayat Ruyat³

Program Studi Teknologi Persenjataan, Universitas Pertahanan
nadhifa.adliana35@gmail.com

Abstrak - Propelan yang telah digunakan pada munisi dalam negeri berasal dari banyak produsen dan masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda. Karakteristik propelan yang diamati pada penelitian ini meliputi komposisi utama, kestabilan, titik nyala, *moisture content*, *bulk density*, nilai kalori, bentuk dan ukuran granulasinya. Dalam pembangunan industri propelan di dalam negeri, diperlukan penjelasan ilmiah mengenai pengaruh karakteristik propelan terhadap balistik interior agar penelitian dan pengembangan propelan di dalam negeri dapat sesuai dengan kualitas yang diharapkan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah melalui eksperimen di laboratorium dan dilanjutkan dengan perhitungan menggunakan metode Heydenreich. Semua karakteristik propelan yang diamati cukup memenuhi spesifikasi yang diperlukan untuk munisi 5.56x45 mm dan karakteristik yang dimiliki propelan cukup memberikan pengaruh terhadap performa propelan. Kemajuan teknologi yang begitu pesat membuat propelan *single base* (sampel A) mampu memiliki performa seperti propelan *double base* (sampel B, C dan D). Kecepatan yang dihasilkan pada balistik interior sangat dipengaruhi oleh dimensi granul dari propelan meliputi bentuk dan ukuran granulasi propelan dimana kecepatan pembakaran dari propelan *extruded* dengan *single perforated* (sampel A) cukup lebih tinggi daripada propelan dengan bentuk *ball* (sampel B dan D) dan *flattered ball* (sampel C). Sampel dengan ukuran diameter lebih kecil (sampel B dan D) memiliki kecepatan pembakaran lebih cepat daripada sampel yang diameternya lebih besar (sampel C). Metode Heydenreich dapat konsisten dengan hasil eksperimen, dapat menghitung kecepatan dan balistik interior terhadap panjang laras.

Kata Kunci: Propelan, Karakteristik Propelan, Balistik Interior, Munisi Kaliber Kecil, Metode Heydenreich

Abstract - Propellants that have been used in domestic munitions come from many producers and each has a different characteristic. Characteristics of propellant observed in this study included the main composition, stability, flash point, moisture content, bulk density, calorific value, shape and size of the granulation. In the construction of the domestic propellant industry, the scientific explanation is needed regarding the effect of propellant characteristics on interior ballistics therefore research and development of domestic propellants can be the desired quality. The method used in this study was through experiments in the laboratory and be continued with calculations using the Heydenreich method. All of propellant characteristics were observed had been sufficient to meet the specifications that required for 5.56x45 mm munitions and the characteristics possessed by propellants had influence on propellant performance. The rapid of advanced technology make single base propellant (sample A) capable of having performance like as double base propellant (samples B, C and D). The velocity of interior ballistics is strongly influenced by the granule dimensions of the propellant

¹ Program Studi Teknologi Persenjataan, Fakultas Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan.

² Prodi Teknologi Pertahanan dan merupakan pembimbing I peneliti.

³ Prodi Teknologi Persenjataan dan merupakan pembimbing II peneliti.

including the shape and size of the propellant granulation where the combustion speed of the extruded propellant with single perforated (sample A) is quite higher than the propellant in the form of ball (sample B and D) and flattered ball sample C). Samples with smaller diameter sizes (samples B and D) have faster combustion speeds than samples with larger diameters (sample C). The Heydenreich method can be consistent with the results of the experiment, it can calculate the velocity and interior ballistics toward the barrel length.

Keywords: Propellant, Propellant Characteristics, Interior Ballistics, Small Caliber Munitions, Heydenreich Method

Pendahuluan

Salah satu prioritas utama kemandirian industri pertahanan Indonesia adalah pengembangan industri propelan⁴.

Propelan merupakan bahan bakar suatu senjata konvensional yang mampu mengubah energi yang dimilikinya menjadi energi kinetik saat terjadi pembakaran ketika munisi telah diketuk pada primernya. Salah satu parameter penting yang mempengaruhi kinerja munisi adalah tingkat pembakaran propelannya.

Pembakaran ini menghasilkan tekanan gas dan mampu memberikan gaya dorong yang mampu menggerakkan dan mempercepat laju proyektil ke depan dan keluar dari laras senjata. Nilai pembakaran tergantung pada banyak

faktor seperti tekanan ruang bakar, geometri propelan, suhu pembakaran, komposisi propelan, oksidator dan lainnya⁵.

Dalam memproduksi munisi diperlukan propelan sebagai zat esensial, namun propelan yang digunakan dalam negeri hingga saat ini masih impor dari luar negeri.

Ada beberapa negara yang menjadi produsen propelan untuk Indonesia yaitu Belgia, Perancis, Swiss, Finlandia, China, Korea, Taiwan, dan Yugoslavia⁶.

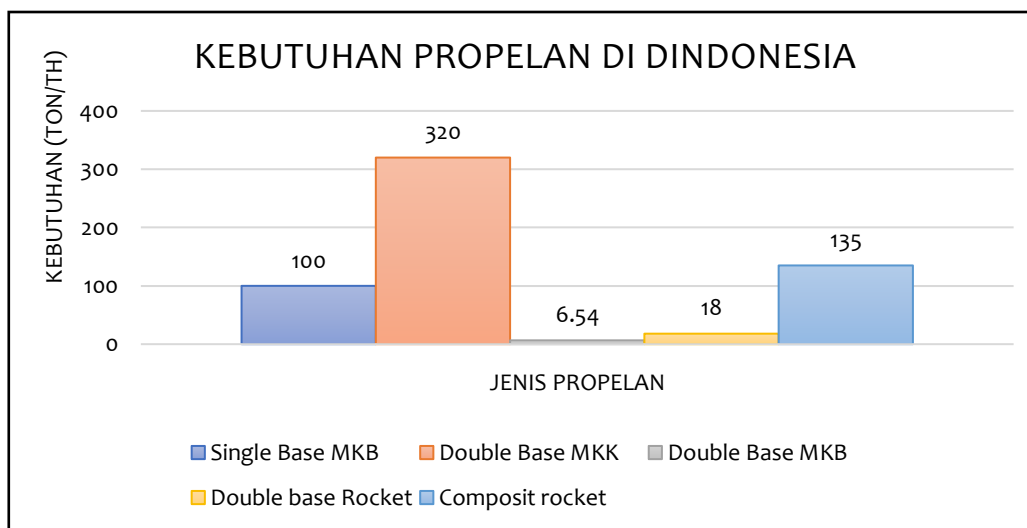
Kebutuhan propelan di Indonesia dari tahun 2002 hingga 2014 adalah sebanyak 1,007,394 kg⁷ dan kebutuhan propelan di Indonesia pertahunnya dapat dilihat pada Gambar 1. Industri propelan

⁴ Kementerian Pertahanan. 2015. *Buku Putih Pertahanan Indonesia 2015*. Jakarta: Kementerian Pertahanan Republik Indonesia, hlm.65.

⁵ Ercan Degirmenci, "Effects of grain size and temperature of double base solid propellants on internal ballistics performance" *Journal of Fuel Elsevier* 146, 2015, hlm 95-120

⁶ Fajar Harry Sampurno, "Membangun Industri Propelan Nasional di Indonesia", pada National Seminar of Energetic Material PT. Pindad, tanggal 8 Mei 2018

⁷ *Ibid.*



Gambar 1. Kebutuhan Propelan di Indonesia

Sumber: Dirjen Pothan Kemhan, 2018

pada munisi kaliber kecil merupakan industri strategis, hal ini sesuai dengan data dari Dirjen Pothan pada Gambar 1 dimana kebutuhan propelan pertahun pada munisi kaliber kecil merupakan paling banyak dibutuhkan di Indonesia dibandingkan dengan propelan munisi kaliber besar dan propelan roket.

Berdasarkan Tabel 1 diketahui bahwa kebutuhan akan munisi kaliber kecil pada TNI AD adalah sebanyak 1,257,275,857 butir untuk rencana strategis tahun 2020-2024⁸. Munisi kaliber kecil (MKK) meliputi munisi ringan kaliber 5.56 hingga 12.7mm, munisi kaliber besar (MKB) meliputi munisi berat kaliber 40 hingga 155mm dan munisi khusus (Musus) seperti granat.⁹ Sedangkan musabang adalah munisi kaliber 23 dan 30mm serta roket yang ditembakkan dari udara

seperti dari heli serang.¹⁰ Hal ini menunjukkan bahwa untuk menyediakan kebutuhan munisi tersebut diperlukan penyediaan propelan dengan jumlah yang mencukupi. Alangkah baiknya jika untuk dalam pemenuhan propelan tersebut tidak lagi bergantung kepada negara lain.

Tabel 1. Kebutuhan Munisi TNI AD Pada Renstra 2020-2024

Jenis Munisi	Jumlah (butir)
MKK	1,257,275,857
MKB	2,406,793
Musus	1,498,006
Musabang	215,359
Total	1,261,396,015

Sumber: Asrena Kasad, 2018

Propelan yang digunakan pada munisi diproduksi oleh banyak produsen dan masing-masing mempunyai karakteristik berbeda, hal ini akan menyebabkan hasil pembakaran yang dihasilkan juga berbeda yang nantinya akan mempengaruhi kinerja munisi yang

⁸ Asrena Kasad, "Kebutuhan Munisi/Roket & Nilai Strategis Smokeless Powder Propellant Dari Perspektif Pengguna", pada National

Seminar of Energetic Material PT. Pindad, tanggal 8 Mei 2018

⁹ Asrena Kasad. *op. cit.*

¹⁰ Asrena Kasad. *op. cit.*

diproduksi dalam negeri. Dalam mendukung pertahanan negara, industri pertahanan Indonesia diharapkan mampu mempertahankan kualitas kinerja dihasilkan dengan bentuk propelan yang stabil. Salah satu hal yang dapat dilakukan adalah memiliki kemandirian dibidang propelan, baik mandiri dalam hal produksi maupun pengembangan selanjutnya.

Propelan yang digunakan pada munisi kaliber kecil dalam negeri merupakan propelan *single base* dan *double base*. Kedua propelan ini biasa disebut sebagai *smokeless powder*. Perbedaan dari kedua jenis propelan ini adalah adanya tambahan nitrogliserin pada propelan *double base*, sedangkan pada propelan *single base* zat utama nya hanya nitroselulosa saja.

Dalam pengembangan industri propelan dalam negeri, kita harus mengetahui terlebih dahulu karakteristik propelan yang digunakan industri dalam negeri dalam mengisi munisi kaliber kecil. Hal ini tentunya akan berpengaruh terhadap kinerja balistik yang dihasilkan oleh munisi. Diketahui bahwa propelan yang digunakan oleh industri dalam

negeri berasal dari produsen yang berbeda, dimana setiap produsen menghasilkan bentuk partikel propelan yang berbeda seperti *ball*, *flattered ball*, dan *extruded with single perforated*. Propelan dalam berbagai bentuk dan sifat fisik dapat memiliki sifat yang berbeda sesuai dengan penggunaan masing-masing propelan¹¹. Tingkat pembakaran propelan meningkat dengan penurunan ukuran partikelnya¹².

Analisis balistik interior sangat penting untuk pengembangan sistem senjata dan erat kaitannya dengan munisi yang digunakan. Balistik interior merupakan salah satu dari fenomena penembakan senjata yang selesai dalam hitungan detik. Energi yang dihasilkan pada balistik interior berasal dari pembakaran propelan, sehingga karakteristik yang dimiliki propelan mempengaruhi tekanan dan kecepatan yang dihasilkan. Karakteristik dari propelan yang akan mempengaruhi balistik interior diantaranya adalah massa propelan, diameter partikel, density, panas pembakaran, spesifik panas

¹¹ Fernanda Diniz Botelho, Erick Galante, dan Álvaro Mendes. "Characteristics and Manufacture of Spherical Smokeless Powders", *Journal of aerospace technology and management* Vol.7 No.4, 2015

¹² Xiaode Guo, et al, "The Influence Of Spherical Granular Propellants On The Combustion Properties Of High-Burning-Rate Propellant" *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion* Volume 9, 2010

propelan, daya konduksi panas propelan¹³.

Analisis balistik interior digunakan untuk memprediksi kecepatan dan tekanan puncak proyektil di dalam laras senjata. Analisis ini telah digunakan untuk memahami fenomena penembakan senjata yang tidak dapat diamati secara langsung oleh mata telanjang. Misalnya, efek dari sistem pembakaran propelan dan gerakan propelan dapat diprediksi melalui metode analitik (perhitungan) atau numerik. Menggunakan metode analitik atau numerik untuk merancang sistem senjata juga mengurangi risiko dan biaya pengembangan. Pada penelitian ini, dalam menganalisis balistik interior digunakan metode eksperimen dan perhitungan analitik Heydenreich.

Metode Heydenreich adalah metode empiris yang berguna untuk melengkapi eksperimen balistik interior¹⁴. Ini memungkinkan untuk mengevaluasi tekanan, kecepatan proyektil dan posisi proyektil sepanjang waktu. Metode Heydenreich meliputi balistik interior dan konsep termodinamika sehingga dapat menyelidiki efek dari propelan, amunisi dan parameter senjata lainnya. Untuk

mendukung keakuratan, penggunaan metode ini dibandingkan dengan data eksperimen.

Metodologi Penelitian

Penelitian yang dilakukan dalam penelitian eksperimen laboratorium. Penelitian eksperimen merupakan penelitian yang dimaksudkan untuk mengetahui ada tidaknya akibat dari sesuatu yang dikenakan pada subjek selidiki. Variabel bebas pada penelitian ini adalah sampel propelan untuk munisi 5.56 x 45 mm dengan dari empat produsen yang berbeda. Variabel terikat pada penelitian ini adalah hasil pengujian balistik interior yang meliputi kecepatan dan tekanan gas yang dihasilkan. Penelitian dilanjutkan dengan perhitungan balistik interior melalui metode Heydenreich. Hasil perhitungan melalui balistik interior kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk validasi.

Pada balistik interior, berlaku hukum pertama Termodinamika yaitu hukum kekekalan energi, dimana menyatakan bahwa energi tidak bisa diciptakan dan tidak bisa dimusnahkan

¹³ Ahmed Bougamra and Huilin Lu, "Multiphase CFD Simulation of Solid Propellant Combustion in A Small Gun Chamber", *International Journal of Chemical Engineering*, 2014, hlm. 5.

¹⁴ P.O. Cronemberger, et al, "Theoretical and experimental study of the interior Ballistics of a Rifle 7.62", *Thermal Engineering Journal Vol.12 No.2*, 2014, hlm.22.

dalam sebuah proses, energi hanya bisa berubah bentuk. Nilai total kalori (Q) merupakan energi yang disediakan pada pembakaran propelan yang akan menghasilkan energi untuk mendorong proyektil terlepas dari selongsongnya. Nilai yang memberikan pengaruh pada total kalori (Q) adalah massa propelan yang digunakan (m_p) dan gaya dorong yang dihasilkan dari nilai kalori propelan (F) dan didapatkan rumus sebagai berikut.

$$Q = m_p \cdot F \quad (1)$$

Untuk melengkapi hasil analisis balistik interior, digunakan metode Heydenreich. Dalam metode ini, massa proyektil dan propelan, diameter laras, panjang laras, kecepatan moncong dan tekanan maksimum dalam laras diperlukan sebagai data masukan. Kemudian, persamaan yang tepat dan tabel empiris seperti yang disarankan oleh metode Heydenreich diatur untuk menghitung distribusi tekanan / kecepatan sepanjang laras¹⁵.

Tabel 2. Sumber data metode Heydenreich

Parameter	Sumber Data
Massa proyektil, M	Data di industri
Massa propelan, m_p	Data di industri
Diameter proyektil, D	Data di industri
Panjang laras, L	Data di industri

¹⁵ Abdullah Senturk, Halil Isik, and Celal Evci, "Thermo-mechanically coupled thermal and stress analysis of interior ballistics problem".

Muzzle velocity, V_o	Hasil eksperimen
Tekanan maksimum, P_m	Hasil eksperimen

Sumber: Cronemberger, 2014

Dalam metode ini, massa proyektil (M), dan massa propelan (m_p), diameter proyektil (D), panjang laras (L) kecepatan pada mulut laras (V_o), dan tekanan maksimum (P_m) diperlukan sebagai data awal, sedangkan untuk menentukan tekanan rata-rata (V_{avg}) dapat menerapkan persamaan berikut.

$$p_{avg} = 2 \frac{M+0.5 m_p}{L \pi D^2} V_o^2 \quad (2)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa gas pada proyektil adalah sama dengan energi kinetik dari proyektil ditambah pendekatan energi kinetik gas dalam metode Heydenreich, mengingat bahwa semua propelan dibakar. Data selanjutnya yang diperlukan adalah rasio tekanan (η) atau parameter perjalanan tembakan (λ).

$$\eta = \frac{p_{avg}}{P_m} \quad (3)$$

Rasio tekanan didefinisikan sebagai η , di mana P_{avg} adalah tekanan rata-rata di dalam balistik interior.

$$S_m = L \cdot \Sigma(\eta) \quad (4)$$

$$t_m = \frac{2L}{V_o} \theta(\eta) \quad (5)$$

$$V_m = V_o \cdot \phi(\eta) \quad (6)$$

Tabel fungsi data empiris Heydenreich, $\Sigma(\eta)$, $\theta(\eta)$, $\phi(\eta)$, $\Pi(\eta)$, $T(\eta)$ digunakan untuk menentukan posisi proyektil saat tekanan maksimum (S_m), waktu saat tekanan maksimum (t_m) dan kecepatannya saat tekanan maksimum (V_m).

$$t_0 = \frac{2L}{V_0} \cdot T(\eta) \quad (7)$$

$$P_0 = V_{avg} \Pi(\eta) \quad (8)$$

Total waktu dari balistik interior (t_0) dan tekanan pada mulut laras (P_0) ketika proyektil keluar dari laras juga ditentukan oleh tabel data empiris dari $T(\eta)$ dan $\Pi(\eta)$.

$$\lambda = \frac{S}{S_m} \quad (9)$$

Setelah menentukan posisi proyektil pada saat tekanan maksimum, parameter perjalanan tembakan (λ) dapat dihitung. Dalam persamaan ini, S adalah posisi proyektil di dalam laras.

$$P = P_m \cdot \psi(\lambda) \quad (10)$$

$$V = V_m \cdot \varphi(\lambda) \quad (11)$$

$$t = t_m \cdot \delta(\lambda) \quad (12)$$

Tabel data empiris dari metode Heydenreich untuk parameter λ melengkapi nilai fungsi $\psi(\lambda)$, $\varphi(\lambda)$ dan $\delta(\lambda)$, yang digunakan untuk menghitung,

masing-masing dari tekanan (P), kecepatan proyektil (V), dan waktu balistik interior (t).

Hasil dan Pembahasan

Komposisi Utama Propelan

Dari data produsen propelan diketahui bahwa dari keempat jenis propelan ada yang memiliki komposisi utama yang berbeda. Hal ini dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Komposisi Utama Sampel Propelan

No	Nama Sampel	Hasil Penelitian
1	Sampel A	Single base
2	Sampel B	Double base
3	Sampel C	Double base
4	Sampel D	Double base

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sampel A merupakan propelan yang komposisi utamanya adalah nitroselulosa sehingga disebut propelan *single base*¹⁶. Sedangkan sampel B, C dan D mempunyai komposisi utama nitroselulosa dan nitrogliserin sehingga disebut sebagai propelan *double base*¹⁷.

Kestabilan

Kestabilan bertujuan untuk memastikan propelan yang digunakan masih memenuhi standar dan dapat menghasilkan tekanan gas yang

¹⁶ Jai Prakash Agrawal, *High Energy Materials Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, (Weinheim : Wiley, 2010), hlm.213

¹⁷ *Ibid.*, hlm.214.

maksimal. Prosedur pengujian ini mengacu kepada MIL-STD-286C dan Bofors yaitu menggunakan *Methyl Violet Test*. *Methyl Violet Test* merupakan cara penentuan stabilitas kimia propelan melalui pengukuran interval waktu yang diperlukan untuk menghasilkan gas nitrogen oksida dari sampel yang dipanaskan¹⁸. Ester nitrat mampu terurai menjadi gas nitrogen oksida, kemudian dideteksi menggunakan perubahan warna standar dari kertas indikator *Methyl Violet*. Sampel dikatakan tidak stabil jika kertas indikator berubah warna dari ungu menjadi pink salmon secara menyeluruh¹⁹. Hasil dari pengujian kestabilan untuk keempat sampel menunjukkan bahwa setiap sampel dalam keadaan stabil, sehingga dapat menghasilkan hasil yang sama pada setiap pengujian atau penembakan jika telah dimasukkan pada munisi.

Titik Nyala

Flash point (titik nyala) merupakan temperatur terendah dimana zat mudah terbakar dengan adanya percikan atau nyala api²⁰. Pengujian ini diperlukan untuk

menunjukkan bahwa propelan yang digunakan tidak memiliki masalah dalam pembakaran dan cukup aman digunakan (tidak akan mengalami *autoignition*), dimana pengujian ini menggunakan *open cup flash point testing*. Hasil dari pengujian ini adalah sebagai berikut.

Tabel 4. Hasil Pengujian Titik Nyala Sampel Propelan

No	Nama Sampel	Hasil Pengujian
1	Sampel A	170°C
2	Sampel B	167°C
3	Sampel C	171°C
4	Sampel D	173°C

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

Seluruh sampel dari pengujian titik nyala telah memenuhi spesifikasi industri dalam negeri, dimana titik nyala untuk propelan yang digunakan pada munisi adalah minimal 165°C. Titik nyala pada keempat sampel tidak berbeda cukup jauh, namun pada hasil pengamatan, sampel C menghasilkan api dan asap yang cukup besar daripada sampel lainnya. Api dan asap yang cukup besar bisa menunjukkan bahwa hasil pembakaran tidak sempurna.

Penentuan bentuk dan ukuran Granulasi

Bentuk granul sampel propelan dilihat pada mikroskop dan ukuran

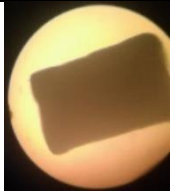

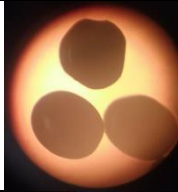
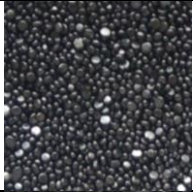
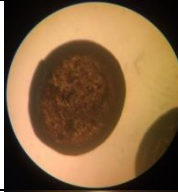
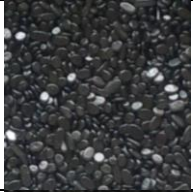
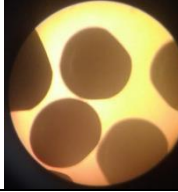
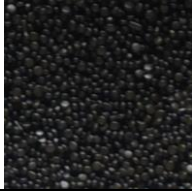
¹⁸ Bofors, *Analytical Methods for Powders and Explosive*, (Sweden: AB Bofors, 1974), Hlm.46

¹⁹ Bofors, *Op. Cit*, Hlm.47.

²⁰ Jing Yang, Et Al, "The Density, Viscosity, Vapor Pressure, Melting Point and Flash Point of a

Liquid Propellant: 1-(2-Azidoethyl) Pyrrolidine", *Journal of Fluid Phase Equilibria*, 2016, hlm. 23

Tabel 5. Bentuk dan Ukuran Granulasi Sampel Propelan

No	Nama Sampel	Gambar Mikroskop	Gambar tanpa mikroskop	Nama dan Ukuran Granul Propelan
1	A			<i>Extruded (single perforated)</i> Panjang : 0.96 mm Diameter granul : 0.75 mm Diameter perforasi : 0.14 mm
2	B			<i>Ball</i> Diameter : 0.44 – 0.53 mm
3	C			<i>Flattered ball</i> Diameter : 0.6 – 0.9 mm
4	D			<i>Ball</i> Diameter : 0.44 – 0.53 mm

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

diameter propelan dicek menggunakan skala pengukuran, sehingga didapatkan data pada Tabel 5.

Sampel A memiliki bentuk *extruded* dengan *single perforated*, dimana panjang dari tabungnya adalah 0.96 mm, diameter granulnya 0.75 mm dan diameter perforasinya adalah 0.14 mm. Sampel A memiliki cukup berbeda dari sampel lainnya, dimana sampel B dan D memiliki bentuk *ball* dengan diameter 0.44-0.53mm dan sampel C memiliki bentuk *flattered ball* dengan diameter 0.6-0.9mm.

Nilai Kalori

Nilai energi tidak dapat diukur dengan mudah, namun perubahan suhu yang disebabkan oleh aliran energi panas antara benda atau zat dapat diukur menggunakan kalorimeter. Pada umumnya kalorimeter bom diisi oleh gas oksigen, namun pada pengujian propelan, kalorimeter bom diisi dengan gas nitrogen. Propelan kaya akan kandungan oksigen yang digunakan untuk proses pembakarannya sendiri, penggunaan nitrogen pada kalorimeter bom agar perhitungan penggunaan oksigen pada proses pembakaran tidak terpengaruh oksigen dari luar.

Nilai kalori merupakan indikasi besarnya energi yang dikeluarkan jika suatu zat terbakar sempurna. Hal ini menunjukkan jumlah energi yang digunakan pada propelan dalam pembakaran di dalam munisi. Hasil pengujian nilai kalori pada beberapa sampel dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Kalori Sampel Propelan

No	Nama Sampel	Nilai Kalori
1	Sampel A	899.41 kal/g
2	Sampel B	900.59 kal/g
3	Sampel C	861.20 kal/g
4	Sampel D	915.20 kal/g

Sumber: Hasil Olahan Peneliti

Hasil pengujian nilai kalori menunjukkan bahwa, nilai sampel A, B dan D memenuhi spesifikasi industri dalam negeri yang dibutuhkan utk munisi 5.56 adalah 890- 920 kal/g. Berdasarkan teori, diketahui bahwa komposisi utama propelan berpengaruh cukup besar terhadap nilai kalori, dimana propelan *double base* lebih besar energinya daripada *single base*. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian bahwa sampel B dan D yang merupakan propelan *double base* nilai kalorinya lebih besar daripada sampel A yang merupakan propelan *single base*. Namun pada sampel C hasilnya tidak sesuai dengan teori, dimana energinya lebih kecil daripada sampel A. Hal ini dikarenakan sampel C

menghasilkan pembakaran yang tidak sempurna karena pada uji titik nyala, sampel C menghasilkan nyala api dan asap yang terlihat lebih berbeda daripada sampel lainnya. Hal inilah yang menyebabkan sampel C mempunyai nilai kalori dibawah dari spesifikasi yang diperlukan.

Moisture Content

Moisture Content (kelembaban) menunjukkan kadar air yang terkandung dalam campuran suatu bahan. Prosedur pengujian ini mengacu kepada MIL-STD-286C dimana menggunakan metode oven. Hasil dari penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Moisture Content Sampel Propelan

No	Nama Sampel	Hasil Pengujian
1	Sampel A	1.03 %
2	Sampel B	0.64 %
3	Sampel C	0.52 %
4	Sampel D	1.06 %

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

Sampel A dan D diketahui memiliki kelembaban yang lebih tinggi daripada sampel B dan C. Perlu diketahui bahwa penyimpanan pada sampel A, B dan C berada pada tempat yang telah memenuhi standar penyimpanan, sedangkan sampel D berasal dari penyimpanan yang tidak memenuhi standar sehingga mudah terpengaruh cuaca dari lingkungan yang membuatnya

mudah menyerap air. Pada sampel A yang walau telah disimpan pada tempat yang memenuhi standar, namun tetap memiliki nilai kelembaban yang lebih tinggi dari sampel B dan C, hal ini dikarenakan sampel A hanya disimpan pada wadah kemasan kardus yang tebal dengan dilapisi plastik, Bahan kardus memungkinkan untuk penyerapan air pada sampel propelan, sedangkan sampel B dan C disimpan dalam wadah kemasan yang berasal dari lapisan logam.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa digunakan tingkat kelembaban dari seluruh sampel masih berada di bawah batas maksimal yakni 1.25 %, sehingga seluruh sampel masih memenuhi spesifikasi yang diperlukan oleh industri dalam negeri untuk dimanfaatkan pada munisi kaliber 5,56 x 45 mm SS109/M855.

Bulk Density

Bulk density menunjukkan besarnya massa propelan dalam satuan volume. Prosedur pengujian ini mengacu kepada metode analitik Bofors. Hasil dari pengujian dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Bulk Density Sampel Propelan

No	Nama Sampel	Hasil Pengujian
1	Sampel A	970 g/L
2	Sampel B	1030 g/L
3	Sampel C	1030 g/L
4	Sampel D	990 g/L

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

Bulk Density pada sampel A dan D lebih rendah daripada sampel B dan C. hal ini memperlihatkan bahwa sampel dengan nilai *moisture content* yang tinggi memiliki ukuran partikel yang besar (kepadatannya kurang) sehingga nilai *bulk density*-nya menjadi rendah. Hal ini menunjukkan bahwa *bulk density* berbanding terbalik dengan *moisture content*.

Spesifikasi industri dalam negeri untuk *bulk density* adalah berada pada nilai 945 hingga 1025 g/L. Hasil penelitian *bulk density* menunjukkan bahwa sampel A dan D telah memenuhi spesifikasi, namun pada sampel B dan C mempunyai *bulk density* diatas spesifikasi yang diharapkan, yaitu 1030 g/L. Berdasarkan teori diketahui bahwa *bulk density* yang cukup tinggi akan menghasilkan nilai kalori yang tinggi, hal ini sesuai dengan yang dialami oleh sampel B, dapat disimpulkan bahwa nilai dari karakteristik propelan ini cukup mempengaruhi antara satu dengan lainnya. Sementara sampel C yang mempunyai nilai *bulk density* besar, malah mempunyai nilai kalori yang kecil hal ini disebabkan sampel C menghasilkan pembakaran yang tidak sempurna, sehingga nilai kalori yang dihasilkan tidak bisa maksimal.

Eksperimen Uji Balistik

Pada penelitian ini menggunakan dua jenis propelan yang berbeda yaitu *single base* dan *double base*. Untuk mempermudah penelitian, maka total nilai kalori pada setiap sampel harus disamakan menggunakan persamaan 1. Pada penelitian ini menggunakan sampel B sebagai acuan. Berdasarkan data balistik industri dalam negeri, diketahui bahwa sampel B untuk mencapai kecepatan 903-927 m/s pada V_{25} diperlukan sebanyak 1.69 gram. Dari nilai total kalorinya dan menggunakan persamaan 1, diketahui total kalori (Q) yang dihasilkan oleh propelan selama pembakaran adalah 1517.49 kal. Sampel propelan yang lain yang telah diketahui nilai kalorinya, kemudian di hitung massanya berdasarkan kesamaan jumlah energinya, sehingga diperoleh data pada Tabel 9.

Tabel 9. Massa Propelan untuk Uji Balistik

No	Nama Sampel	Nilai Kalori (F)	Massa Propelan (m_p)
1	Sampel A	899.41 kal/g	1.69 gram
2	Sampel B	900.59 kal/g	1.69 gram
3	Sampel C	861.20 kal/g	1.76 gram
4	Sampel D	915.20 kal/g	1.66 gram

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

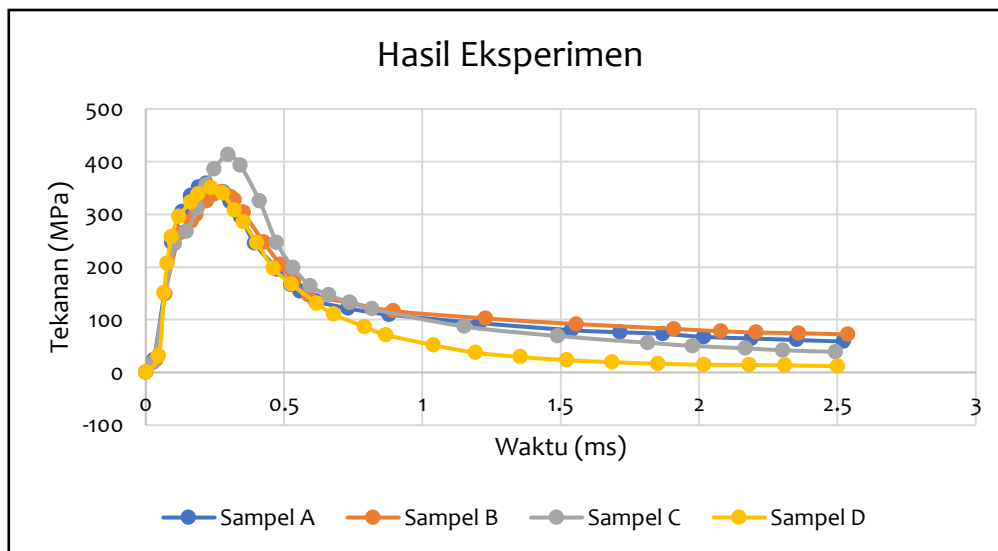
Dalam melakukan uji balistik pada penelitian ini, untuk setiap butir munisi dibutuhkan sampel A sebanyak 1.69 gram, sampel B sebanyak 1.69 gram, sampel C sebanyak 1.76 gram dan sampel D sebanyak 1.66 gram. Sampel propelan ditimbang sebanyak yang diperlukan dan dimasukkan ke dalam selongsong, kemudian di satukan dengan proyektilnya. Massa proyektil diketahui sebanyak 4 gram dan diameter proyektilnya adalah 5.56.

Tabel 10. Data Hasil Uji Balistik

No	Nama Sampel	P_m (MPa)	t_m (ms)	V_o (m/s)
1	Sampel A	357.7	0.22	943.01
2	Sampel B	332.8	0.27	928.84
3	Sampel C	413.9	0.29	1002.7
4	Sampel D	350.1	0.23	929.25

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

Semua data pada tabel 10 ini merupakan hasil rata-rata dari pengujian 10 kali penembakan. Tekanan maksimal (P_m) merupakan tekanan maksimal yang dihasilkan dari hasil pengujian dan ditangkap oleh sensor *piezoelectric*, sedangkan t_m merupakan waktu yang diperlukan untuk mencapai tekanan maksimal. *Muzzle velocity* (V_o) merupakan kecepatan saat proyektil berada di mulut laras dan hasil kalkulasi pada *system controller* yang ditangkap oleh sensor *light screen*.



Gambar 2. Hasil Eksperimen Uji balistik Tekanan terhadap waktu
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

Hubungan Karakteristik Propelan terhadap Balistik Interior

Berdasarkan tabel 10 dapat diketahui bahwa tekanan maksimal yang dihasilkan dari masing-masing sampel masih dibawah batas maksimal untuk tekanan maksimal munisi 5.56 x 45mm SS109/M855 yang sesuai spesifikasi industri dalam negeri yaitu 420 MPa. Hasil uji balistik dapat dilihat pada gambar 3.

Pengujian balistik dilakukan dengan menggunakan total nilai kalori (Q) yang sama. Berdasarkan hukum kekekalan energi dengan menggunakan total nilai kalori yang sama akan menghasilkan tekanan maksimal yang sama atau tidak jauh berbeda antara satu dengan yang lainnya. Total nilai kalori menunjukkan energi yang digunakan pada proses pembakaran propelan. Sampel A, B dan D relatif menghasilkan P_m yang tidak

berbeda karena nilai antara ketiganya tidak berada pada jarak yang jauh.

Dari gambar 3 diketahui bahwa sampel C memiliki tekanan maksimal yang lebih tinggi daripada sampel lainnya. Sampel C menghasilkan P_m yang begitu besar diperkirakan karena adanya komposisi kimia-nya yang tidak dimiliki oleh sampel lain, seperti adanya kandungan grafit yang cukup tinggi daripada sampel lainnya yaitu 0.4%, sedangkan sampel lainnya hanya 0.02-0.25% untuk sampel A, 0.25% untuk sampel B, dan 0.18 untuk sampel D. Grafit adalah zat yang tersusun atas unsur karbon (C) yang sering ditambahkan pada propelan sebagai bahan pelapis pada permukaan granulasi propelan²¹, dimana akan membuat bahan propelan lebih cepat menghantarkan panas.²² Kandungan grafit yang berlebih ini membuat

²¹ Jai Prakash Agrawal, *op. cit.*, hlm.228

²² *Ibid.*, hlm. 169

propelan mempunyai kelebihan kandungan karbon yang akan sulit untuk teroksidasi secara sempurna membentuk karbon dioksida. Karbon yang dibiarkan tanpa teroksidasi akan terjadi pembakaran tidak sempurna dan membentuk karbon monoksida yang memberikan asap hitam saat ledakan karena oksigen tidak cukup untuk pembentukan karbon dioksida.²³ Hal ini sesuai dengan hasil pengamatan saat pengujian, bahwa terlihat adanya asap saat yang keluar dari laras senjata. Selain itu, didukung juga dengan nilai entalpi pembentukan gas karbon monoksida yang lebih positif daripada nilai entalpi pembentukan gas karbon dioksida.

Entalpi pembentukan gas karbon monoksida adalah -110.5 kJ/mol, sedangkan entalpi pembentukan gas karbon dioksida adalah -393.5 kJ/mol.²⁴ Dari data ini diketahui bahwa nilai entalpi karbon monoksida lebih positif, sehingga lebih banyak melepaskan panas dari sistem ke lingkungan dan temperatur menjadi lebih tinggi. Pada volum tetap, jika temperatur yang dihasilkan lebih

tinggi akan membuat reaksi pembakaran menghasilkan tekanan lebih tinggi. Hal inilah yang membuat sampel C memiliki nilai P_m yang paling tinggi daripada sampel lainnya.

Sampel C yang saat pengujian balistiknya terlihat asap keluar dari mulut laras, menunjukkan bahwa sampel C tidak cukup bagus menjadi propelan munisi kaliber 5.56 x 45 mm karena propelan untuk munisi kaliber 5.56 x 45 mm merupakan propelan tanpa asap dan jika keluar asap dari mulut laras selama penembakan akan cukup mempengaruhi keselamatan prajurit dimana lokasi penembakan akan diketahui oleh musuh dari asap yang dikeluarkan. Penggunaan propelan tanpa asap memberikan tingkat keamanan dan keselamatan kepada prajurit agar tidak terdeteksi.²⁵

Kecepatan yang dapat dilihat dari pengujian berupa kecepatan pada mulut laras (V_0), sedangkan distribusi kecepatan yang terjadi selama proyektil masih di dalam laras hanya dapat di prediksi melalui perhitungan, salah satunya dengan metode Heydenreich. Kecepatan

²³ *Ibid.*, hlm.18

²⁴ Nopriawan, "Standar Entalpi Pembentukan dan Reaksi", dalam <http://www.kampus-digital.com/2017/03/standar-entalpi-pembentukan-dan-reaksi.html>, diakses pada 30 Januari 2019

²⁵ M.N.A.G Yolhamid, Et Al, "The Novel Usage Nitrocellulose as A Propellant Of 5.56 Mm Bullet." *Journal of Solid State Phenomena* Vol 280, Hlm. 361-367

mulut laras ini merupakan kecepatan yang paling maksimal dihasilkan selama reaksi balistik dan kecepatannya akan turun secara bertahap setelah memasuki balistik exterior. Kecepatan yang dihasilkan merupakan perwujudan dari adanya tekanan yang dihasilkan selama proses pembakaran propelan, dimana sampel dengan tekanan maksimal (P_m) cukup besar akan menghasilkan kecepatan mulut laras (V_o) yang cukup besar juga, begitupun sebaliknya.

Cepatnya energi yang dikeluarkan tergantung kepada dimensi granul propelan²⁶. Hal ini sesuai waktu yang diperlukan untuk mencapai tekanan maksimal (t_m) yang dihasilkan dari sampel pengujian. Sampel B dan D memerlukan lebih cepat daripada sampel C. Sampel B dan D memiliki bentuk granul berupa *ball* dan berdiameter 0.44 – 0.53 mm, sedangkan sampel C memiliki bentuk *Flattered ball* dengan diameter granul 0.6 – 0.9 mm. Dari data ini dapat dikatakan bahwa yang memiliki diameter lebih kecil memiliki luas permukaan lebih besar sehingga waktu pembakarannya lebih cepat. Namun pada sampel A yang memiliki bentuk *extruded* dengan *single*

perforated, sampel A memiliki waktu lebih cepat daripada bentuk *ball*. Peristiwa serupa juga terjadi pada penelitian sebelumnya, dimana propelan propelan *extruded* waktu konsumsi pembakarannya lebih tinggi daripada propelan berbentuk *ball* (*spherical*).²⁷

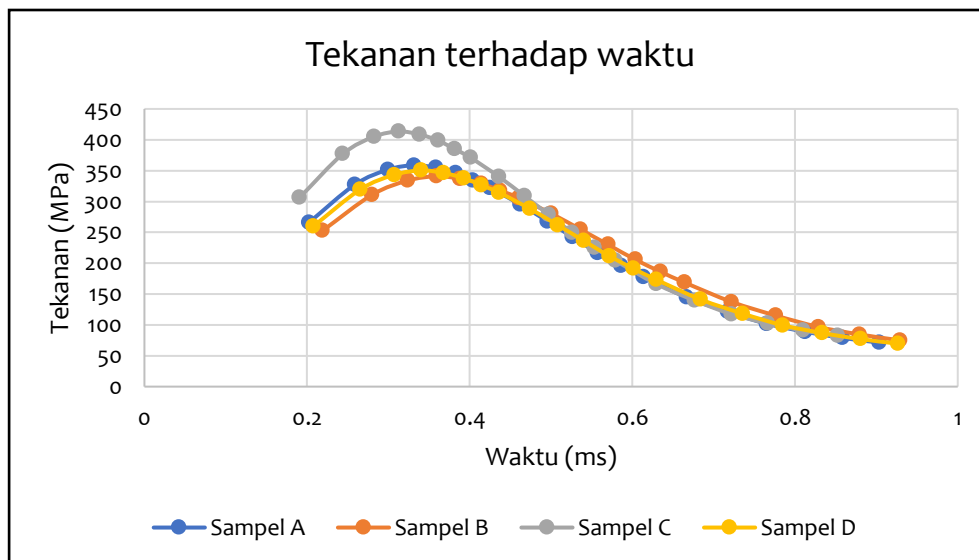
Pada pengujian balistik, total nilai kalori yang digunakan adalah sama, sehingga karakteristik propelan yang memberikan pengaruh pada mekanisme pembakaran adalah bentuk fisik dan ukuran granulasi propelannya. Karakteristik lain seperti kestabilan, titik nyala, *moisture content* dan *bulk density* telah memenuhi spesifikasi industri dalam negeri untuk munisi 5.56 x 45 mm SS109/M855 dan nilai karakteristik tersebut tidak cukup berbeda dari setiap sampelnya sehingga dianggap sama.

Hasil eksperimen hanya bisa di dapatkan grafik tekanan terhadap waktu hingga 2.5 ms, namun tidak bisa diketahui batas waktu saat propelan sampai ke mulut laras (t_o). Hal ini bisa di prediksi melalui metode Heydenreich, begitu juga dengan kecepatan yang dihasilkan munisi

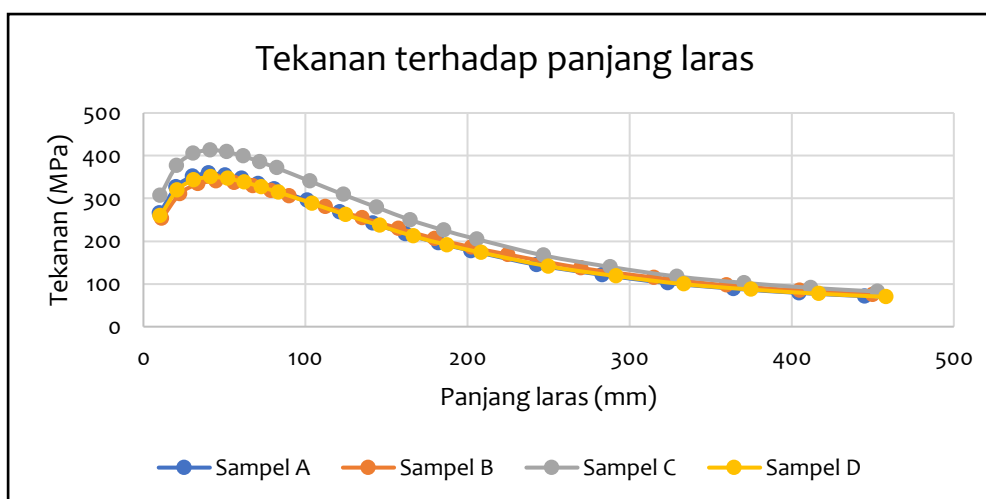
²⁶ Kare Roald Strandli, *Interior Ballistic* (AS: Nammo, 2004)

²⁷ Mehmed Akcay, "Internal and Transitional Ballistic Solution for Spherical and Perforated

Propellants and Verification with Experimental Results". *Journal of Thermal Science and Technology*, Turkish Military Academy, 2017



Gambar 3. Hasil Perhitungan Heydenreich Tekanan terhadap waktu
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018



Gambar 4. Hasil Perhitungan Heydenreich Tekanan terhadap Panjang Laras
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

dalam laras senjata hanya bisa diprediksi melalui pendekatan perhitungan, salah satunya dengan metode Heydenreich.

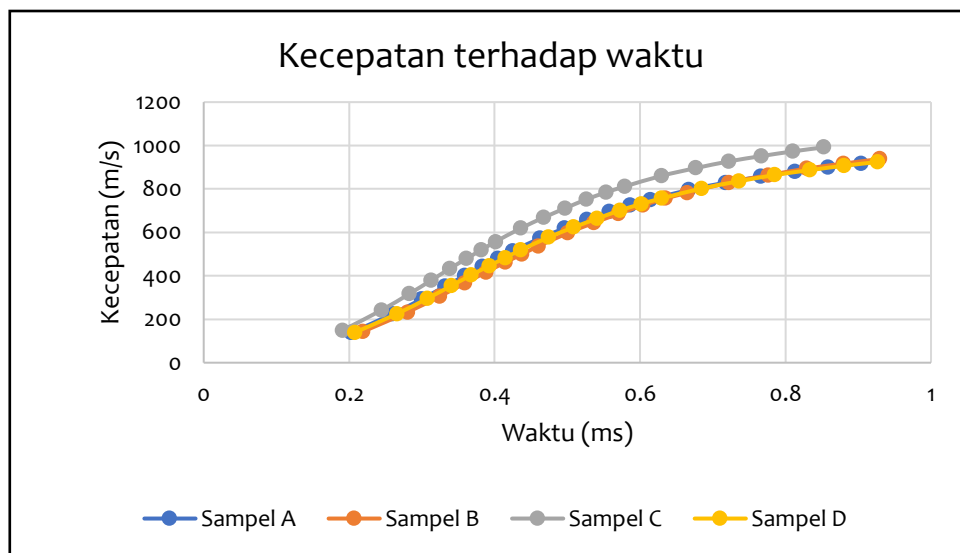
Balistik Interior dengan Metode Heydenreich

Hasil perhitungan melalui metode Heydenreich dari keempat sampel didapatkan empat buah grafik yang dapat dilihat pada Gambar 3, hingga Gambar 6.

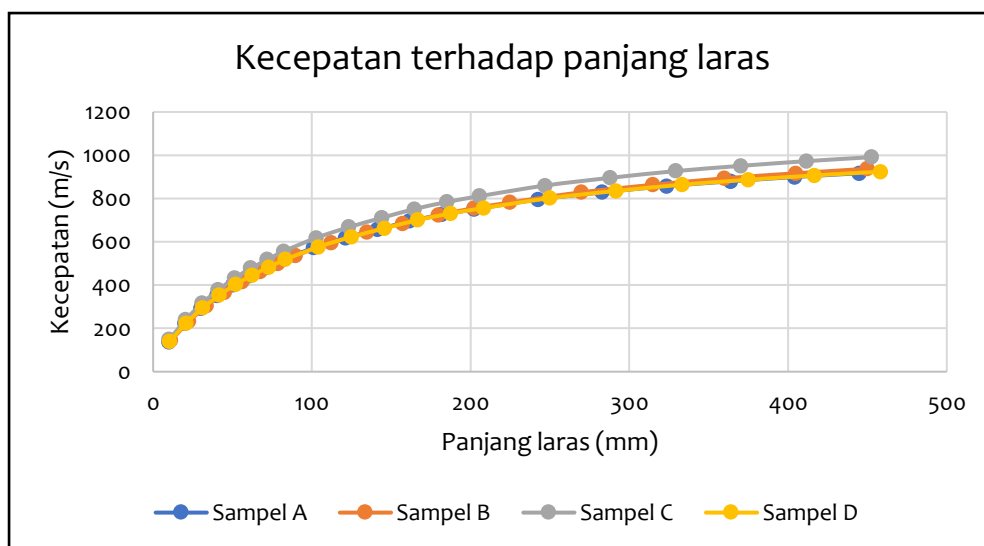
Dalam interior balistik, diasumsikan bahwa propelan telah habis terbakar sebelum proyektil melewati mulut laras. Tekanan yang terjadi pada balistik interior

merupakan tekanan gas yang dihasilkan oleh pembakaran propelan, sehingga terjadi peningkatan tekanan yang ekstrem dan mendorong proyektil terlepas dari selongsong dan proyektil bergerak dengan cepat. Pergerakan proyektil menghasilkan perluasan terhadap ruang bakar dalam laras dan tekanan gas semakin bertambah ke titik maksimal seiring bertambahnya waktu.

Tekanan maksimal menunjukkan bahwa propelan telah terbakar sempurna. Setelah mencapai tekanan



Gambar 5. Hasil Perhitungan Heydenreich Kecepatan terhadap Waktu
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018



Gambar 6. Hasil Perhitungan Heydenreich Kecepatan terhadap Panjang Laras
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

maksimal, tekanan pada pada laras akan turun secara bertahap seiring laju perubahannya terhadap waktu. Proses dalam balistik interior terjadi pada kondisi adiabatik, dimana tidak terjadi perpindahan kalor ke lingkungan dan terjadi sesudah pembakaran selesai. Dari Gambar 3 diketahui bahwa waktu yang diperlukan untuk balistik interior pada keempat sampel adalah ± 1 ms. Hal ini menunjukkan bahwa waktu yang diperlukan untuk balistik interior begitu

singkat dan sulit untuk diamati secara manual.

Gambar 4 merupakan grafik mengenai hasil perhitungan Heydenreich tekanan terhadap panjang laras. Saat mencapai tekanan maksimal, proyektil dari telah terlepas dari selongsong. Panjang laras yang digunakan adalah 463 mm, dimana panjang laras ini dimulai dari titik nol dimana mulai terjadi pergerakan proyektil yang terlepas dari selongsongnya. Tekanan yang dihasilkan saat dimulut laras adalah 70.11 MPa

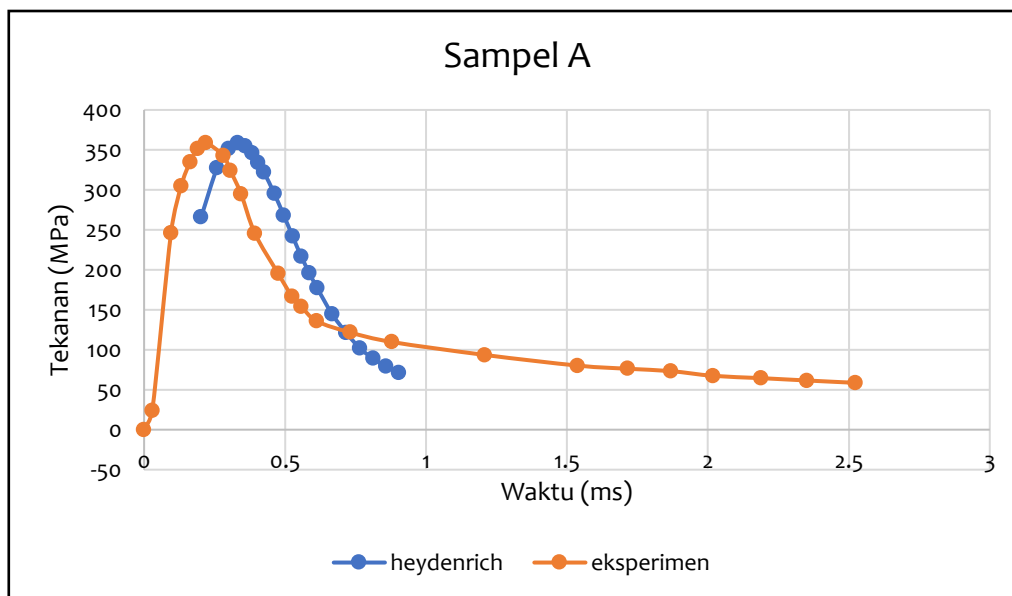
(sampel A), 77.83 MPa (sampel B), 82.87 MPa (sampel C) dan 74.46 MPa (sampel D). Hal ini menunjukkan bahwa setelah mencapai titik maksimal, tekanan akan turun sesuai dengan gerakan majunya proyektil melewati laras karena adanya proses politropik.

Gambar 5 menunjukkan grafik mengenai hasil perhitungan Heydenreich kecepatan terhadap waktu. Kecepatan proyektil di dalam laras bisa di prediksi melalui metode Heydenreich dan terlihat bahwa kecepatan semakin meningkat seiring bertambahnya waktu. Titik puncak dari kecepatan yang dihasilkan berada pada mulut laras dan kecepatan inilah sebagai kecepatan awal proyektil keluar dari mulut laras.

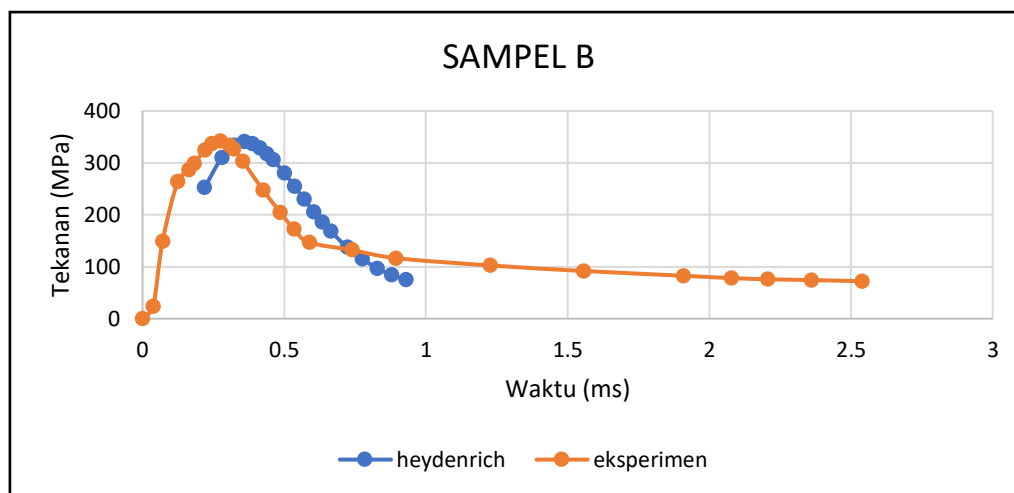
Pada Gambar 6 diketahui bahwa adanya grafik kecepatan terhadap panjang laras. Dari grafik, masih diketahui bahwa kecepatan mulut laras yang paling tinggi dimiliki oleh sampel C. Sampel A, B dan D terlihat tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan.

Hasil perhitungan menggunakan metode Heydenreich dari keempat sampel diatas kemudian dibandingkan atau divalidasi dengan hasil eksperimen yang dapat dilihat pada Gambar 7 hingga Gambar 10. Data hasil eksperimen merupakan data yang paling akurat

karena dilakukan sesuai rancangan pengujian yang telah disusun berdasarkan standar pengujian. Sedangkan metode Heydenreich merupakan pendekatan yang dilakukan untuk menghasilkan data yang mendekati eksperimen. Validasi dilakukan untuk menunjukkan bahwa metode dilakukan sesuai dengan peruntukannya dan dapat menghasilkan analisis yang baik. Data yang bisa dibandingkan hanya data tekanan terhadap waktu, karena hanya data tersebut yang di dapatkan dari hasil pengujian dan terlihat pada gambar 8 hingga gambar 11. Distribusi tekanan sepanjang waktu menunjukkan hasil yang konsisten antara hasil eksperimen dan perhitungan melalui metode Heydenreich, yaitu kemiringan grafik menunjukkan hasil yang sama. Adapun perbedaan yang terlihat adalah berupa penundaan waktu antara hasil eksperimen dan perhitungan dimana hasil eksperimen lebih cepat terjadi daripada hasil perhitungan. Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui prosedur perhitungan dan teori yang berlaku pada fenomena ini. Perbandingan hasil eksperimen dan perhitungan melalui metode Heydenreich



Gambar 7. Hasil Tekanan terhadap waktu untuk Sampel A
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018



Gambar 8. Hasil Tekanan terhadap waktu untuk Sampel B
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

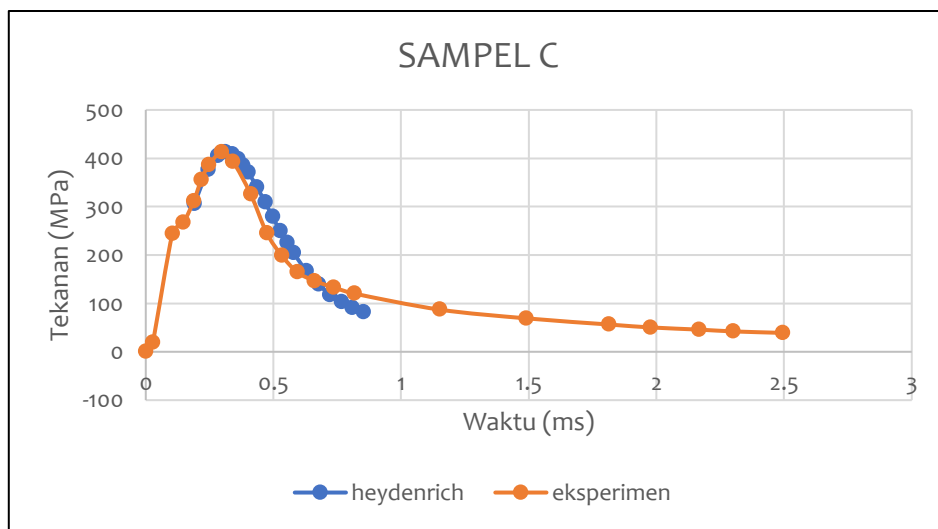
pada setiap sampel akan dianalisis sebagai berikut.

Pada Gambar 7 menunjukkan adanya perbedaan waktu antara kedua grafik. Pada eksperimen dibutuhkan t_m sebesar 0.22 ms dan t_m untuk Heydenreich adalah sebesar 0.33 ms. Selisih dari kedua nilai t_m ini adalah 0.11 ms, sehingga dihasilkan persentase eror dari t_m adalah sebesar 50.00 %.

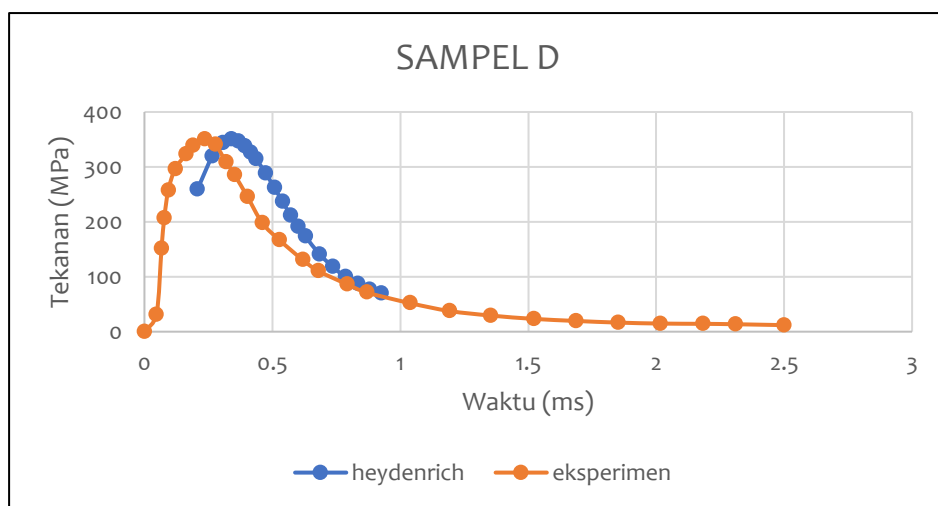
Pada gambar 9, hasil balistik antara hasil eksperimen dan perhitungan

Heydenreich masih menunjukkan hal yang sama, yaitu adanya perbedaan waktu. Pada hasil eksperimen diketahui bahwa untuk mencapai tekanan maksimal diperlukan waktu sebesar 0.27 ms dan pada perhitungan Heydenreich diperlukan t_m sebesar 0.36 ms. Terdapat selisih sebesar 0.09 ms dan persentase eror yang terjadi adalah 33.33 %.

Pada gambar 10 terlihat adanya perbedaan hasil balistik sampel C dengan sampel lainnya. Terlihat bahwa selain



Gambar 9. Hasil Tekanan terhadap waktu untuk Sampel C
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018



Gambar 10. Hasil Tekanan terhadap waktu untuk Sampel D
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2018

profil balistik yang sama, titik t_m antara hasil eksperimen dan perhitungan Heydenreich hampir bertemu. Pada hasil eksperimen, dibutuhkan t_m sebesar 0.29 ms dan pada perhitungan Heydenreich diperlukan t_m sebesar 0.31 ms. Dari kedua t_m hanya ditemukan selisih sebesar 0.02 ms dan persentase eror sebesar 6.89 %.

Seperti yang terlihat pada gambar 8 dan gambar 9, pada gambar 11 juga menunjukkan pola yang sama, dimana adanya konsistensi profil balistik antara hasil eksperimen dan perhitungan

Heyderich namun berbeda pada sisi waktu. Pada hasil eksperimen dibutuhkan waktu sebesar 0.23 ms untuk mencapai tekanan maksimal dan pada perhitungan Heydenreich diperlukan t_m sebesar 0.34, sehingga dihasilkan selisih sebesar 0.11 dan persentase eror sebesar 47.82 %.

Hasil Gambar 8 hingga 11 diketahui ada perbedaan pada waktu antara pengukuran saat eksperimen dan perhitungan menggunakan metode Heydenreich. Perbedaan ini mencakup waktu pada saat P_m maupun waktu

selama tekanan gas dihasilkan sepanjang laras.

Perhitungan Heydenreich hanya membutuhkan data awal sebanyak 6 buah, yaitu panjang laras, tekanan maksimal, kecepatan pada mulut laras, massa propelan, massa proyektil dan diameter proyektil. Dalam perhitungan waktu Heydenreich hanya menggunakan data V_0 dengan menggunakan persamaan 5, persamaan 7 dan persamaan 12. Perbedaan selisih waktu yang begitu besar juga disebabkan karena data input yang begitu sedikit, sementara dalam balistik interior dipengaruhi oleh banyak faktor, yaitu senjata yang digunakan, munisi dan propelan itu sendiri. Pada penelitian ini, laras senjata dan munisi yang digunakan diasumsikan dalam kondisi yang sama, sedangkan pada pembakaran propelan tidak hanya dipengaruhi faktor massa propelan namun juga dipengaruhi bentuk dan ukuran propelan.

Cepatnya pembakaran atau waktu yang diperlukan untuk pembakaran propelan dipengaruhi oleh dimensi granulasi propelan²⁸ yang berupa bentuk dan ukurannya. Hal inilah yang menyebabkan adanya perbedaan waktu

yang diperlukan pada balistik interior untuk hasil eksperimen dan perhitungan Heydenreich. Bentuk dan ukuran propelan ini tidak diperhitungkan dalam metode Heydenreich karena dianggap tidak memberikan pengaruh pada waktu pembakaran propelan, setiap propelan diasumsikan memiliki bentuk dan ukuran yang sama pada setiap perhitungan Heydenreich. Pada penelitian ini menggunakan tiga jenis bentuk dan ukuran propelan yang berbeda, yaitu berbentuk *extruded* dengan *single perforated* (sampel A), *ball* (sampel B dan D) dan *flattered ball* (sampel C). Adanya perbedaan pada nilai t_m terdapat jarak antara kedua grafik tersebut (gambar 4.6 hingga gambar 4.9). Pada sampel A persentase error t_m adalah sebesar 50.00 %, pada sampel B persentase error t_m adalah sebesar 33.33 %, pada sampel C persentase error t_m adalah sebesar 6.89 % dan pada sampel D persentase error t_m adalah sebesar 47.82 %. Persentase error t_m yang cukup kecil untuk sampel C menunjukkan bahwa perhitungan Heydenreich cocok untuk propelan yang memiliki bentuk *flattered ball* karena waktu pembakaran saat eksperimen paling lambat dan tidak cocok untuk

²⁸ Kare Roald Strandli, Interior Ballistic, (AS : Nammo, 2004), hlm.39

propelan yang memiliki bentuk *ball* atau *extruded* dengan *single perforated* karena waktu pembakaran saat eksperimen lebih cepat.

Simpulan

1. Karakteristik propelan yang diamati pada penelitian ini meliputi komposisi utama kestabilan, titik nyala, nilai kalori, *moisture content*, *bulk density*, bentuk dan ukuran granulasi dari propelan. Semua karakteristik yang diamati cukup memenuhi spesifikasi yang diperlukan untuk munisi 5.56x45 mm SS109/M855.
2. Kemajuan teknologi yang begitu pesat membuat propelan *single base* (sampel A) mampu memiliki performa seperti propelan *double base* (sampel B, C dan D)
3. Kecepatan yang dihasilkan pada balistik interior sangat dipengaruhi oleh dimensi granul dari propelan meliputi bentuk dan ukurannya dimana kecepatan pembakaran dari propelan *extruded* dengan *single perforated* (sampel A) cukup lebih tinggi daripada propelan dengan bentuk *ball* (sampel B dan D) dan *flattered ball* (sampel C). Sampel dengan

ukuran diameter lebih kecil (sampel B dan D) memiliki kecepatan pembakaran lebih cepat daripada sampel yang diameternya lebih besar (sampel C).

4. Metode Heydenreich dapat konsisten dengan hasil eksperimen, dapat menghitung kecepatan dan balistik interior terhadap panjang laras
5. Metode Heydenreich tidak memperhitungkan dimensi granul sebagai input awal, sehingga membuat adanya perbedaan waktu yang dibutuhkan pada balistik interior untuk metode eksperimen dan metode Heydenreich Metode Heydenreich cocok untuk propelan yang memiliki bentuk *flattered ball* dan kurang cocok untuk propelan yang mempunyai bentuk *ball* dan *extruded* dengan *single perforated*.

Saran

Sebagai bentuk tanggung jawab secara akademis dari peneliti, maka berdasarkan hasil penelitian serta simpulan penelitian ini, peneliti memberikan saran untuk perkembangan

penelitian selanjutnya yaitu metode Heydenreich dapat digunakan dalam perkembangan teknologi persenjataan yang mampu menganalisis pengaruh karakteristik propelan terhadap balistik interior pada munisi kaliber kecil.

Daftar Pustaka

Buku

- Agrawal, Jai Prakash. 2010. *High Energy Materials Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. Weinheim: Wiley.
- Bofors. 1974. *Analytical Methods for Powders and Explosive*. Sweden: AB Bofors.
- Departement of Defense USA. 1967. *Military Standard Propellants, Solid: Sampling, Examinaton and Testing. MIL-STD-286C*
- Oerlikon. 1981. *Oerlikon Pocket-Book*. Zurich
- Kementerian Pertahanan. 2015. *Buku Putih Pertahanan Indonesia 2015*. Jakarta: Kementerian Pertahanan Republik Indonesia
- Kubota, Naminosuke. 2002. *Propellant and Explosives Thermochemical Aspects of combustion*. Jerman: Wiley
- Strandli, Kare Roald. 2004. *Interior Ballistic*. AS: Nammo.

Jurnal

- Botelho, Fernanda Diniz, Erick Galante, dan Álvaro Mendes. 2015. "Characteristics and Manufacture of Spherical Smokeless Powders". *Journal of aerospace technology and management* Vol.7 No.4

- Cronemberger, P. O, E. P. Lima Junior, J. A. M. Gois and A. B. Caldeira. 2014. "Theoretical and experimental study of the interior Ballistics of a Rifle 7.62". *Thermal Engineering Journal* Vol.12 No.2 December 2014. hlm.20-27

- Degirmenci, Ercan. 2015. "Effects of grain size and temperature of double base solid propellants on internal ballistics performance". *Journal of Fuel Elsevier* 146. 2015. hlm.95-120.

- Guo, Xiaode, Fengsheng Li, Ji-Yuan Liang, Wei Jiang and Lu-Kui Zhao. 2010. "The Influence of Spherical Granular Propellants On The Combustion Properties of High-Burning-Rate Propellant" *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. Volume 9.

- Jang, Jin-Sung, H. G. Sung, T. S. Roh and D. W Choi. 2013 "Numerical analysis of interior ballistics through eulerian-lagrangian approach" *Journal of Mechanical Science and Technology* Volume 27. hlm.2351-2357

- Liao, Xin, Jun Zhao, Bin Xu and Ze-Shan Wang. 2015. "Modelling and simulation of interior ballistics based on actual combustion characteristics of propellant". *Journal of Energetic Materials*. hlm.155-166.

- Senturk, Abdullah, Halil Isik, and Celal Evci, "Thermo-mechanically coupled thermal and stress analysis of interior ballistics problem". *International Journal of Thermal Sciences* No.104, 2016, hlm.39-53

- Yang, Jing, Aijun Gong, Yayu Li, Zhaoyang Liu, Tao Fang, Rongpei Jiang, Haiyun Sun and Lina Qiu. 2016. "The density, viscosity, vapor pressure, melting point and flash point of a

liquid propellant: 1-(2-azidoethyl) pyrrolidine”, *Journal of Fluid Phase Equilibria*, 2016, hlm. 23

Yolhamid, M. N. A. G, Farizha Ibrahim, M. A. U. A. A. Zarim, Rushdan Ibrahim, Sharmiza Adnan, and Muhd Zu Azhan Yahya. 2018. “The Novel Usage of Nitrocellulose as a Propellant of 5.56 mm Bullet”. *Journal of Solid State Phenomena*. Vol. 280. hlm. 361-367.

Seminar/Kuliah

Sampurno, Fajar Harry. 2018. *Membangun Industri Propelan Nasional di Indonesia*. National Seminar of Energetic Material PT. Pindad 8 Mei 2018

Asrena Kasad. 2018. *Kebutuhan Munisi/Roket & Nilai Strategis Smokeless Powder Propellant Dari Perspektif Pengguna*. National Seminar of Energetic Material PT. Pindad 8 Mei 2018

Ruyat, Yayat. 2018. *Ammunition and Explosion System*. Materi Kuliah IAEPP Prodi TS Unhan 2018.

Referensi Lain

Nopriawan. 2017. *Standar Entalpi Pembentukan dan Reaksi*. <http://www.kampus-digital.com/2017/03/standar-entalpi-pembentukan-dan-reaksi.html>. Diakses pada 30 Januari 2019